مطالعه‌ی آزمایشگاهی تأثیر استقرار آب شکن T شکل بر توپوگرافی پایین دست بستر قوس ۹۰ درجه*

«یادداشت پژوهشی»

محمد واقفی[(۱)]　　　　مسعود قدسیان[(۲)]

چکیده یکی از روش های متداول ساماندهی و کنترل فرسایش کناری رودخانه، استفاده از آب شکن می‌باشد. آب شکن با هدایت جریان به سمت محور رودخانه از ایجاد جریان قوی در طول ساحل، جلوگیری کرده و مانع از فرسایش ساحل رودخانه می‌شود. استقرار آب شکن در مسیر جریان، باعث ایجاد آب‌شستگی‌های موضعی در محل آب‌شکن و تغییرات توپوگرافی پایین دست قوس می‌گردد. در این مقاله به بررسی اثر آب‌شکن های T شکل مستقر در قوس ۹۰ درجه بر توپوگرافی بستر پرداخته شده است. آزمایشات مورد نظر در کانالی با قوس۹۰ درجه و شرایط آب تمیز، طراحی و اجرا شد. در این آزمایشات، تأثیر پارامترهای طول آب‌شکن، موقعیت قرارگیری آب‌شکن در قوس و همچنین عدد فرود جریان بر تغییرات توپوگرافی بستر در پایین دست آب‌شکن، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحقیق، نشان دهنده‌ی وجود دو چاله‌ی آب‌شستگی در طول قوس است که یک چاله در دماغه‌ی آب‌شکن و دیگری در پایین دست آب‌شکن، شکل می‌گیرد. نتایج، بیانگر این است که با افزایش طول آب‌شکن، ابعاد چاله‌ی آب‌شستگی اول افزایش و چاله‌ی آب‌شستگی دوم کاهش می‌یابد. با افزایش طول آب‌شکن فاصله‌ی چاله‌ی آب‌شستگی دوم از آب‌شکن افزایش می‌یابد. با تغییر موقعیت آب‌شکن به سمت پایین دست، قوس چاله‌ی آب‌شستگی بزرگتر می‌شود. همچنین معادلاتی جدید در محاسبه‌ی عمق آب‌شستگی ماگزیمم و حجم چاله‌ی آب‌شستگی تدوین شده است.

واژه‌های کلیدی آب‌شکن T شکل، چاله‌ی آب‌شستگی، توپوگرافی قوس، آب‌شستگی بیشینه، چاله‌ی پایین دست

An Experimental Study on the Effect of T Shape Spur Dike on Down Sream Topography in a 90 Degree Bend

M. Vaghefi　　　　M. Ghodsian

Abstract *One of the common methods of river training and bank protection is using spur dikes. Building spur dikes makes the flow path to be modified. Because of the concentration of flow in the middle part of the river it causes the river side not to be washed out. Setting spur dikes in the flow's direction leads to a local scour in the spur dike site and the change in the bed's topography of the bend down stream. this paper examines the effect bed's topography around the T shaped spur dike located in a 90 degree bend by conducting several tests. These tests were carried out in an experimental channel with a bend of 90 degrees and under conditions with clear water. These experiments, in fact, measured the effects of such parameters like the length of the spur dike, the location of the spur dike in the bend, the flow Froud number on the down stream bed topography. The results of investigation show that two scour hole forms due to a T shaped spur dike. One at the nose of spur dike and the other one at the downstream of the spur dike. By increasing the length of the spur dike, the dimensions of first scour hole increase. But the dimensions of second scour hole decrease. By increasing the length of the spur dike the distance of location of second scour hole from the spur dike increases.Any change in the position of the spur dike toward the down stream of the bend, increases the dimensions of scour hole. Also, New equations for maximum scour depth and scour volumeat a T shaped spur dike are developed.*

Key Words T Shape Spur Dike, Scour Hole, Bed Topography, Maximum Scour, Down Stream Hole.

---

* نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ ۸۷/٤/۳ و نسخه‌ی نهایی آن در تاریخ ۸۹/۵/۱۸ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده‌ی مسئول، استادیار سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه خلیج فارس

(۲) استاد هیدرولیک، پژوهشکده‌ی مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه

استفاده از آب‌شکن ها در تثبیت سواحل رودخانه ها از جمله راه‌های مؤثر در پایداری ساحل می‌باشد، اما وجود آب‌شکن‌ها در مسیر جریان، باعث ایجاد آب‌شستگی موضعی می‌گردد. رسوبات خروجی از اطراف آب‌شکن می‌تواند تأثیر زیادی بر روی توپوگرافی بستر رودخانه ها، خصوصاً در پایین دست محل استقرار آب‌شکن داشته باشد. در مسیر های قوسی نیز به‌دلیل وجود جریان‌های ثانویه و ترکیب آن با جریان های طولی، جریان‌های مارپیچی موسوم به جریان حلزونی، تشکیل می‌گردد. این جریانات، باعث فرسایش شدید ساحل خارجی، مخصوصاً در سواحل فرسایش پذیر می‌شود. استقرار آب‌شکن ها در ساحل خارجی رودخانه‌ها می‌تواند در کاهش فرسایش پذیری کناره‌ها مؤثر باشد. هنگامی‌که از آب‌شکن‌ها برای محافظت قوس خارجی رودخانه استفاده می‌شود، تحلیل جریان و آب‌شستگی بسیار پیچیده‌تر و مشکل‌تر می‌گردد. که علت آن، اندرکنش بین الگوی جریان در قوس و الگوی جریان اطراف آب‌شکن و تأثیر جریان‌های حلزونی در قوس‌ها می‌باشد.

مطالعات گذشته، بیشتر در مورد آب‌شکن‌های مستقر در مسیرهای مستقیم بوده است و اکثراً به بررسی تغییرات آب‌شستگی بیشینه و هندسه چاله‌ی آب‌شستگی پرداخته شده است. در مورد قوس‌ها و کاربرد آب‌شکن ها درمحل قوس، تحقیقات زیادی انجام نگرفته است و در مطالعات گذشته نیز توپوگرافی پایین دست قوس، کم‌تر مدنظر محققان بوده است. اولین تحقیق در مورد به‌کارگیری آب‌شکن در قوس، توسط Ahmad (۱۹۵۱ و۱۹۵۳) انجام گرفت. وی با تغییر پارامترهای دبی جریان، نسبت انقباض، شکل آب‌شکن، موقعیت استقرار در قوس، زاویه‌ی آب‌شکن با جریان و دانه بندی رسوبات در کانال مستقیم و قوسی، به بررسی عمق آب‌شستگی ماکزییم پرداخت. Gill (۱۹۷۲) با تغییر شعاع انحنای قوس عمق جریان و قطر ذرات در کانال مستقیم و قوسی نشان داد که فاصله‌ی بین آب‌شکن ها وابستگی زیادی به شعاع انحنای قوس دارد و در مسیرهای قوسی، حدود یک تا دو برابر طول آب‌شکن خواهد بود. Tingasnchali و Maheswaran (۱۹۹۰) به اصلاح ضرایب مربوط در مدل عددی k-ε به دلیل انحناء خطوط جریان در قوس و در اطراف آب‌شکن پرداختند و نتیجه گرفتند که این ضریب، تأثیر عمده‌ای بر میزان سرعت جریان دارد؛ در حالی که بر تنش برشی ماگزیمم در دماغه‌ی آب‌شکن، تأثیر قابل توجهی ندارد.

Mesbahi (۱۹۹۲) آزمایشات خود با آب‌شکن در قوس را به‌گونه‌ای تنظیم نمود که عرض جریان در جلوی آب‌شکن، نسبت به حالت بدون آب‌شکن تغییری ننماید و نتیجه گرفت که احداث آب‌شکن در قوس ها، عمق چاله‌ی آب‌شستگی را عمیق‌تر می‌کند.

Soliman و همکاران (۱۹۹۷) به بررسی آزمایشگاهی و عددی تأثیر آب‌شکن بر روی مورفولوژی قوس‌های رودخانه‌ی نیل پرداختند و یک مدل دو بعدی در خصوص تأثیر آب‌شکن ها و مؤلفه‌های سرعت ارائه نمودند.

Giri و همکاران (۲۰۰٤) به صورت آزمایشگاهی و عددی با اندازه گیری سرعت و تغییر دادن موقعیت آب‌شکن ها به تأثیر آن بر روی میدان جریان اطراف آب‌شکن بسته در کانال قوسی پرداخت.

Fazli و همکاران (۲۰۰۷) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر موقعیت استقرار آب‌شکن های مستقیم در قوس ۹۰ درجه پرداختند. Forghani و همکاران (۲۰۰۷) به مطالعه‌ی آزمایشگاهی الگوی جریان و آب‌شستگی پیرامون آب‌شکن های مستقیم و مستقر در قوس۹۰ درجه اقدام نمودند. مطالعات گذشته بیانگر فقدان تحقیقات کافی در مورد آب‌شکن‌های مستقر در قوس است. در مورد آب‌شکن‌های T شکل مستقر در قوس نیز در تحقیقات گسترده ای توسط قدسیان و همکاران (۲۰۰۸) و واقفی و همکاران (۲۰۰۹ و ۱۳۸۷ به بعد) در مورد الگوی آب‌شستگی و الگوی جریان اطراف آب‌شکن T شکل منفرد مستقر در قوس ۹۰ درجه انجام گرفته است.

هدف از این مقاله، بررسی تأثیر آب‌شکن T شکل بر روی توپوگرافی قوس و تغییرات بستر کانال در پایین دست آب‌شکن و نیز مسیر مستقیم پایین دست آب‌شکن می‌باشد. برای این منظور به تأثیر تعدادی از پارامترهای اثرگذار نظیر طول آب‌شکن، عدد فرود جریان و موقعیت استقرار آب‌شکن پرداخته شده است.

آنالیز ابعادی

شکل (۱) مشخصات ابعاد چاله‌ی آب‌شستگی و موقعیت آب‌شکن و شعاع انحنای قوس به صورت شماتیک نشان داده شده است. همچنین در شکل (۲)، پلان و مقطع طولی توپوگرافی بستر ناشی از آب‌شکن T شکل و پارامترهای آن در طول قوس را نشان می‌دهد. پارامترهای مؤثر بر ابعاد چاله‌ی آب‌شستگی ϕدر حالت تعادل در قوس با رابطه‌ی ذیل مشخص می‌گردد:

$$\phi = f(L, Y, \alpha, \theta, B, R, \lambda, S_0, g, d_0, R_c) \qquad (۱)$$

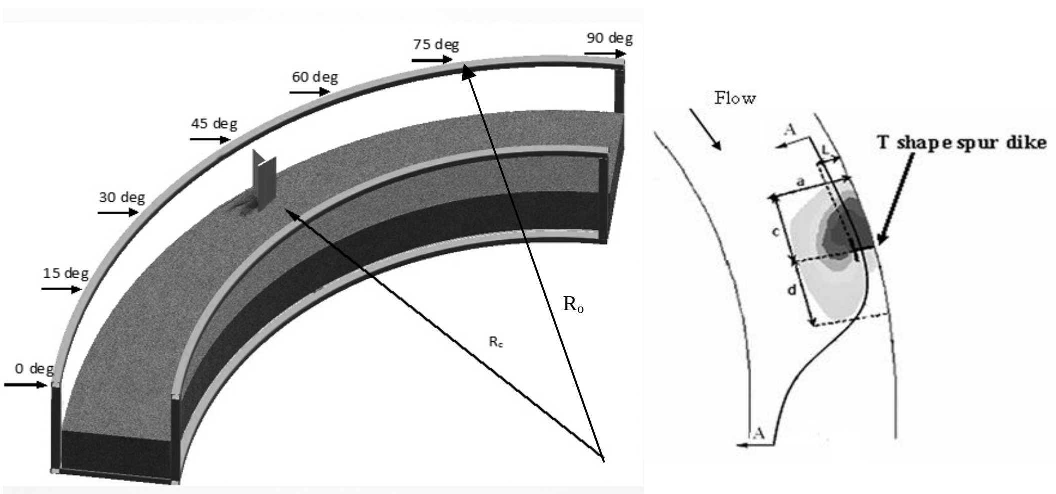
در رابطه‌ی بالا B؛ عرض مجرا، R؛ شعاع انحناء قوس، λ؛ زاویه مرکزی قوس، S_0؛ شیب طولی کف مجرا، L ؛ طول آب‌شکن، θ ؛ زاویه‌ی موقعیت قرارگیری آب‌شکن در قوس، α ؛ زاویه‌ی استقرار محور آب‌شکن نسبت به جهت جریان اصلی، V ؛ حجم چاله‌ی آب‌شستگی، d_0؛ قطر متوسط ذرات، Y ؛ عمق جریان، R_c؛ شعاع مرکزی قوس و g ؛ شتاب ثقل، تعریف شده است. با استفاده از تئوری باکینگهام، رابطه‌ی زیر برای بررسی اثرات متغییرهای مؤثر بر آب‌شستگی تعادل یافته حول آب‌شکن در قوس به دست می‌آید:

$$\frac{\phi}{Y} = f(\theta, Fr, \frac{L}{B}, \frac{R}{B}, \lambda, S_0, \alpha, {d_{50}}/{R_c}) \qquad (۲)$$

با توجه به این که در این تحقیق α، R/B و S_0 مقادیر ثابتی دارند و همچنین قطر مصالح بستر ثابت در نظر گرفته شده است، از آن‌ها صرف نظرشده و از معادله‌ی (۲) حذف می‌شوند بنابراین:

$$\frac{\phi}{Y} = f(\theta, Fr, \frac{L}{B}) \qquad (۳)$$

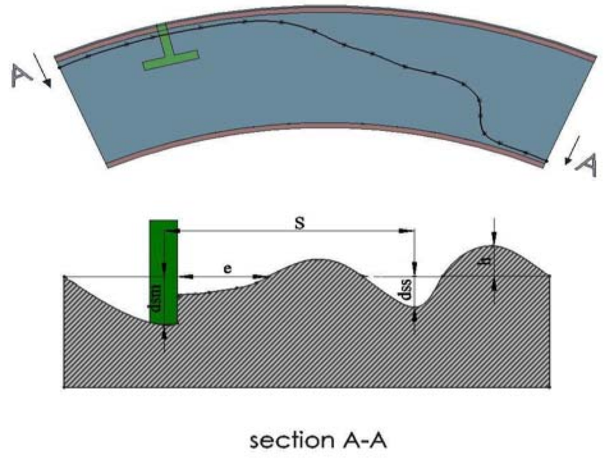
که در آن Fr؛ عدد فرود جریان، ϕ؛ معرف پارامترهای آب‌شستگی (شکل-۲)، dsm؛ شامل حداکثر عمق آب‌شستگی در دماغه‌ی آب‌شکن، dss؛ حداکثر عمق آب‌شستگی در پایین دست آب‌شکن، h؛ ارتفاع بیشینه‌ی رسوبات در پایین دست آب‌شکن، S؛ فاصله‌ی مرکز چاله‌ی آب‌شستگی پایین دست آب‌شکن تا محل استقرار آب‌شکن، e؛ طول آب‌شستگی در ساحل خارجی پایین دست آب‌شکن و V؛ حجم چاله‌ی آب‌شستگی است. قابل ذکر است این در حالی است که V= ϕحجم چاله‌ی آب‌شستگی بدون بعد V/Y^3 می‌باشد.



شکل ۱ نمایش شماتیک ابعاد چاله‌ی آب‌شستگی و شعاع انحنای قوس

الف- پلان

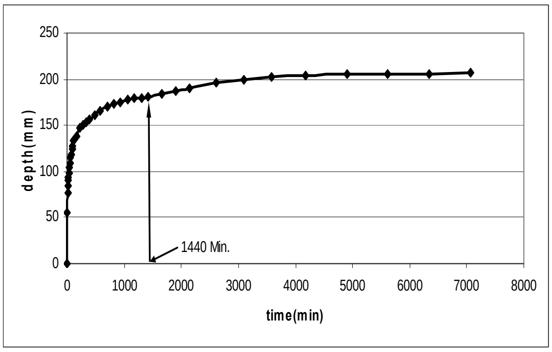
ب- مقطع طولی



شکل ۲ تغییرات توپوگرافی بستر اطراف آب‌شکن T شکل (الف) پلان و (ب) مقطع طولی

آزمایشات

آزمایشات مورد نظر در کانالی با قوس ۹۰ درجه در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس تهران انجام گرفت. این کانال از یک قسمت مستقیم به طول ۷/۱ متر در بالادست و همچنین قسمت مستقیمی‌به طول ۵/۲ متر در پایین دست تشکیل می‌شود که این دو مسیر مستقیم، توسط قوس ۹۰ درجه به شعاع انحنای خارجی ۲/۷ متر به‌هم متصل گردیده است. کانال از جنس شیشه ساخته شده است که توسط قاب‌های فولادی، پایداری آن حفظ می‌گردد. نسبت شعاع قوس به عرض کانال برابر ٤، ارتفاع آن ۷۰ سانتی‌متر و عرض آن ٦۰ سانتی‌متر است. کف کانال از رسوباتی با قطر متوسط ۱/۲۸ میلی متر و انحراف معیار ۱/۳ میلی‌متر پوشیده شده است. دبی جریان، به‌وسیله‌ی یک ارفیس کالیبره شده تنظیم گردید. همچنین عمق جریان و پروفیل بستر با استفاده از یک عمق سنج الکترونیکی (point gage) با دقت ۰/۱ میلی متر، اندازه‌گیری شد. برای کنترل جریان از یک دریچه‌ی قطاعی که در انتهای کانال نصب گردیده، استفاده شد. آب‌شکن ها به صورت صفحات مستطیلی با پلان T شکل و از جنس پلکسی گلاس ساخته شد. ضخامت آب‌شکن ۱ سانتی‌متر و ارتفاع آن ٦۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. به منظور تعیین اثر طول و موقعیت استقرار آب‌شکن بر تغییرات توپوگرافی بسترسری اول آزمایشات در چهار طول متفاوت آب‌شکن: ۱۰%، ۱۵%، ۲۰% و ۲۵% عرض کانال و چهار موقعیت متفاوت:۳۰ ، ٤۵، ٦۰ و ۷۵ درجه در قوس خارجی، طراحی و اجراء گردید. سپس به منظور تعیین اثر عدد فرود جریان، آزمایشاتی با تغییر عدد فرود جریان: ۰/۲۳، ۰/۲۷، ۰/۳ و ۰/۳٤ و با آب‌شکن در موقعیت‌های استقرار متفاوت آب‌شکن در قوس اجرا گردید. نسبت طول بال آب‌شکن به طول آب‌شکن در کلیه‌ی آزمایشات، واحد می‌باشد. تعداد کل آزمایشات انجام شده ۳۸ آزمایش می‌باشد. دبی جریان در کلیه‌ی آزمایشات ثابت و برابر ۲۵ لیتر بر ثانیه می‌باشد. در تمام آزمایشات، شرایط آب تمیز حاکم بود. به منظور تعیین زمان تعادل، یک آزمایش ۱۲۰ ساعته برای آب‌شکن در موقعیت استقرار ۷۵ درجه و یک آزمایش ۸۰ ساعته برای آب‌شکن در موقعیت استقرار ٤۵ درجه، انجام گردید. زمان انجام هر آزمایش، مدت زمان معادل ۰/۸۸ عمق ماکزیمم آب‌شستگی در آزمایش زمان تعادل ۱۲۰ ساعته در نظر گرفته شد که برای هر آزمایش، ۲٤ ساعت می‌باشد. در این زمان، میزان آب‌شستگی در فواصل زمانی ٤ ساعته کم‌تر از ۲ میلی‌متر بوده است. شکل (۳) تغییرات زمانی عمق آب‌شستگی در آزمایش زمان تعادل را نشان می‌دهد.



شکل ۳ تغییرات زمانی عمق آب‌شستگی در آزمایش زمان تعادل

فواصل مقاطع اندازه گیری توپوگرافی بستر از ۰/۵ درجه تا ۵ درجه، متغیر می‌باشد که این مقدار در نزدیکی آب‌شکن تحت شبکه‌بندی ریزتر قرار دارد. تعداد مقاطع عرضی برداشت شده در هر آزمایش، بین ۳۵ تا ٤٥ مقطع، و تعداد مقاطع طولی بین ۲۸ تا ۳۰ مقطع بود. در ابتدای هر آزمایش با استفاده از یک ارابه ی متحرک، بستر کانال، تحت شیب ثابت مسطح می‌گردد، سپس جریان به آرامی‌وارد کانال می‌شود؛ طوری که تغییری در توپوگرافی بستر ایجاد نکند. پس از بالا آمدن سطح آب در کانال به صورت تدریجی، جریان به دبی مورد نظر افزایش می‌یابد. در انتهای آزمایش نیز با خاموش کردن پمپ، جریان به صورت تدریجی از کانال خارج و زه‌کشی کانال در مدت زمان ۲ تا ۳ ساعت انجام می‌گیرد. سپس برداشت پروفیل بستر انجام می‌شود.

تحلیل نتایج

مکانیزم تشکیل پشته رسوبی و حرکت آن‌ها در طول مسیر. پیشروی و توسعه‌ی بار رسوبی در پایین دست آب‌شکن ها و ابعاد هندسه‌ی آن، شاخصی برای ارزیابی کارکرد آب‌شکن‌ها در حفاظت دیواره‌ها و انتخاب فاصله‌ی بین آب‌شکن های متوالی می‌باشد. در ابتدای آزمایش، چاله‌ی آب‌شستگی در بالا دست آب‌شکن و در محدوده‌ی دماغه‌ی آب‌شکن تا جان آب‌شکن، شروع به تشکیل می‌شود. رسوبات خارج شده از چاله ی آب‌شستگی در ابتدا به صورت یک پشته رسوبی بلافاصله در پایین دست بال پایین دست آب‌شکن انباشته می‌ود. این رسوبات دراثر برخورد جریان ورودی از بالا دست به سمت ساحل خارجی متمایل می‌شوند. وجود این پشته‌ی رسوبی به همراه اثر دیواره‌ی بال پایین دست، باعث حفاظت محدوده‌ی بین بال پایین دست آب‌شکن و جان آب‌شکن از آب‌شستگی می‌گردد.



شکل ٤ پروفیل ساحل داخلی کانال در پایان زمان تعادل آزمایش

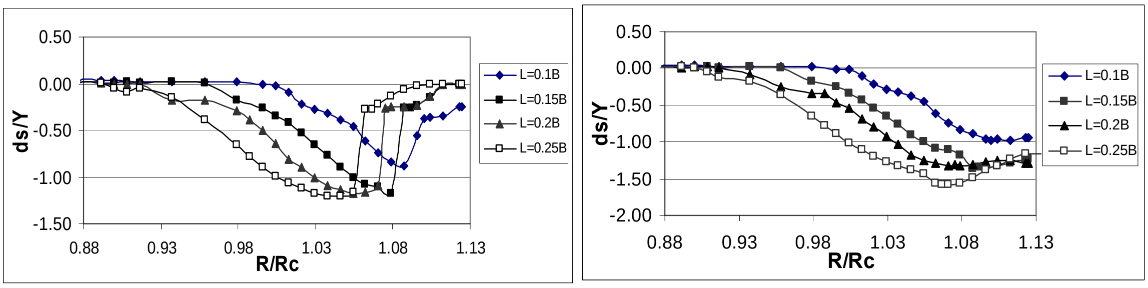
جریان عبوری از روی پشته‌ی رسوبی به بسترپایین دست آن برخورد کرده و اختلاف فشاری که بین این دو منطقه ایجاد می‌گردد، باعث ایجاد گردابه‌های قائم در پایین دست پشته رسوبی می‌شود که باعث آب‌شستگی بعد از پشته رسوبی می‌گردد. نتیجه‌ی آن، ایجاد چاله‌ی آب‌شستگی دیگری در پایین دست آب‌شکن می‌باشد. بدین ترتیب، دو چاله‌ی آب‌شستگی، یکی در محل آب‌شکن و دیگری در پایین دست آن ایجاد می‌شود. با گذشت زمان از شروع آزمایش و افزایش شیب چاله‌ی آب‌شستگی قدرت حمل رسوبات از داخل چاله کم می‌شود و رسوبات، به دلیل راحتی انتقال، متمایل به انتقال در مسیرهای با شیب کم‌تر می‌گردند و بدین ترتیب، بار رسوبی دیگری که به سمت ساحل داخلی کانال پیشروی دارد، شکل می‌گیرد و رسوب‌گذاری در انتهای آزمایشات در ساحل داخلی مشهود می‌باشد. در کلیه‌ی آزمایشات، چاله‌ی آب‌شستگی پایین دست آب‌شکن در نزدیکی ساحل خارجی تشکیل شد و در زمان تعادل، محل چاله به سمت وسط کانال متمایل گردید. همچنین تغییرات زمانی حرکت پشته رسوبی، بیانگر تغییر محل پشته از ابتدای آزمایش و تحت زاویه‌ی حدود ۳۰ درجه نسبت به چاله‌ی پایین دست و به سمت قوس داخلی کانال بود. در شکل (٤)، نمایی از پروفیل بستر در ساحل داخلی در انتهای آزمایش نشان داده شده است. محل آب‌شستگی بیشینه نیز در تمامی آزمایشات در فاصله‌ی حدود ۱۰ تا ۲۰٪ طول آب‌شکن از دماغه‌ی بال بالادست و در کنار دیواره‌ی داخلی بال قرار دارد.

اثر طول آب‌شکن بر توپوگرافی بستر

با افزایش طول آب‌شکن، تنگ شدگی مقطع جریان، افزایش می‌یابد. این امر باعث افزایش قدرت گردابه‌ها می‌شود و تنش برشی در دماغه‌ی آب‌شکن و محدوده‌ی بین دیواره‌ی بال بالادست آب‌شکن و جان آب‌شکن بیشتر و باعث افزایش آب‌شستگی می‌گردد. شکل (٥) نمونه‌ای از پروفیل عرضی بستر بالادست و بلافاصله در پایین دست آب‌شکن برای طول های مختلف و عدد فرود ۰/۳٤ را نشان داده است.

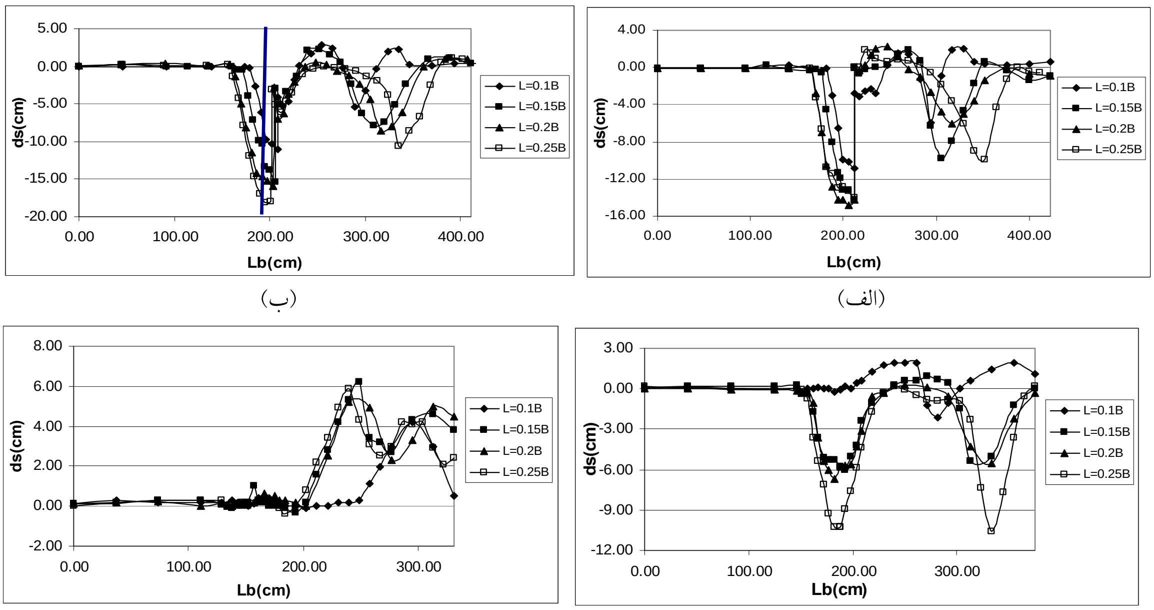
در این شکل، ds؛ عمق موضعی بستر می‌باشد. با افزایش طول آب‌شکن ناحیه‌ی سکون جریان در پایین دست آب‌شکن بیشتر می‌شود و محدوده‌ی بیشتری تحت حفاظت بال قرار می‌گیرد. در این محدوده، آب‌شکن از قدرت جریان ثانویه و در نتیجه جریان حلزونی می‌کاهد؛ بنابراین هر چه طول آب‌شکن بیشتر باشد، آب‌شستگی در این محدوده کم‌تر است. از مقایسه‌ی شکل (الف–٥) و (ب–٥) اختلاف تراز بستر بین بالا دست و پایین دست آب‌شکن مشهود می‌باشد. همچنین شکل (ب–٥) بیانگر اثر افزایش طول آب‌شکن در کاهش آب‌شستگی ساحل خارجی قوس می‌باشد. روشن است که افزایش طول آب‌شکن، تغییرات بیشتری را بر روی پروفیل عرضی بستر به همراه خواهد داشت. شکل (٦) نمونه‌ای از پروفیل های طولی بستردر فاصله‌ی ٥ میلی‌متر از دیواره‌ی خارجی کانال، در محل آب‌شستگی بیشینه از دیواره‌ی خارجی، در وسط کانال و در فاصله‌ی ۱۰ میلی‌متری از ساحل داخلی برای طول‌های مختلف آب‌شکن در موقعیت استقرار ٤٥ درجه و برای عدد فرود، ۰/۳٤ را نشان می‌دهد. در این شکل، Lb؛ فاصله از ابتدای قوس می‌باشد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، در پایین دست آب‌شکن تا انتهای قوس، پشته‌های رسوبی تشکیل شده که در پایین دست این پشته‌ها نیز چاله‌های آب‌شستگی ناشی از جریان عبوری از روی پشته‌ها به سمت بستر اصلی می‌باشد. شکل (ج– ٦) نشان می‌دهد که چاله‌ی آب‌شستگی در پایین دست آب‌شکن تا وسط کانال گسترش یافته است و هرچه طول آب‌شکن بزرگ‌تر باشد، عمق چاله‌ی آب‌شستگی پایین دست، بیشتر است و همچنین رسوب‌گذاری در ساحل خارجی برای آب‌شکن‌های با طول بزرگ‌تر در شکل (د–٦) مشهود می‌باشد. اثر طول آب‌شکن بر روی پروفیل طولی بستر به خوبی در شکل (٦) نشان داده شده است. شکل (٧) نمونه ای ازحداکثر عمق نسبی آب‌شستگی در دماغه‌ی آب‌شکن dsm/Y و حجم نسبی چاله‌ی آب‌شستگی V/Y^3 در برابر L/B را برای آب‌شکن در موقعیت های مختلف نشان می‌دهد. این شکل، مربوط به عدد فرود جریان ۰/۳٤ است و نشان می‌دهد که با افزایش طول

آب‌شکن به دلیل آب‌شستگی موضعی بیشتر و افزایش قدرت حمل رسوبات، عمق بیشینه‌ی آب‌شستگی و حجم چاله‌ی آب‌شستگی بیشتر می‌شود. علاوه بر این، نتایج نشان داد که عمق آب‌شستگی بیشینه از ۱/۲ تا ۲/۲ برابر طول آب‌شکن متغییر می‌باشد. شکل (۸) نمونه‌ای از تغییرات عمق آب‌شستگی نسبی چاله‌ی دوم در پایین دست آب‌شکن، dss/Y بر حسب L/B را در موقعیت های مختلف نشان می‌دهد. این شکل، نشان می‌دهد که با افزایش طول آب‌شکن، عمق آب‌شستگی حفره‌ی دوم، ابتدا روند افزایشی و سپس کاهشی دارد. تا زمانی که نسبت L/B کوچکتر ازحدود ۰/۲است، برای آب‌شکن در تمام موقعیت ها، روند افزایشی عمق آب‌شستگی حفره‌ی دوم وجود دارد؛ اما برای مقادیر بزرگتر یا مساوی حدود ۰/۲، عمق آب‌شستگی نسبی حفره‌ی دوم آب‌شستگی کاهش می‌یابد. در این شرایط به دلیل افزایش طول آب‌شکن، آب‌شستگی در دماغه‌ی آب‌شکن بیشتر خواهد بود و بخشی از رسوبات خارج شده از حفره‌ی اول وارد حفره‌ی دوم می‌شود.



(الف) (ب)

شکل ۵ مقاطع عرضی (الف) بلافاصله در بالادست آب‌شکن و (ب) بلافاصله در پایین دست آب‌شکن برای طول های مختلف آب‌شکن در موقعیت ۴۵ درجه

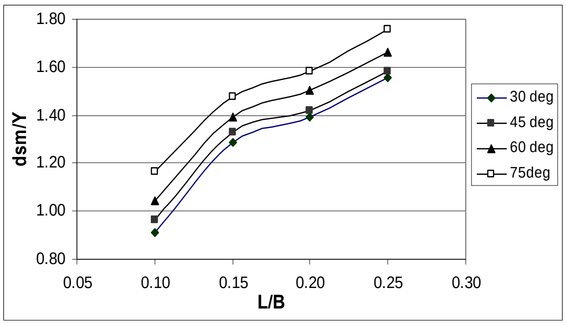


(الف) (ب)

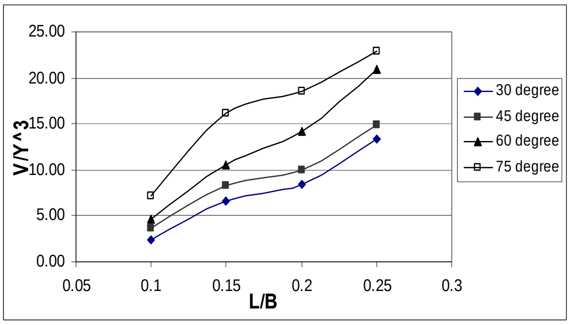
(ج) (د)

شکل ٦ پروفیل طولی بستر (الف) در فاصله‌ی ۵ میلی‌متر از دیواره‌ی خارجی و (ب) در محل آب‌شستگی بیشینه (ج) در وسط کانال (د) در فاصله‌ی ۱۰ میلی‌متر از دیواره‌ی داخلی برای طول های مختلف آب‌شکن و در موقعیت استقرار ۴۵ درجه

شکل (۹) بیانگر نسبت بدون بعد فاصله‌ی نسبی چاله‌ی دوم آب‌شستگی پایین دست تا محل استقرار آب‌شکن، S/Y در برابر L/B می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۹) مشخص است، وقتی آب‌شکن در زاویه‌ی ۶۰ درجه‌ی قوس مستقر است، برای طول های معادل ۱۰٪ عرض کانال، رسوبات خروجی از چاله‌ی آب‌شستگی پیرامون آب‌شکن وارد چاله‌ی پایین دست شده و از تشکیل آن جلوگیری می‌کند. در موقعیت استقرار آب‌شکن در زاویه‌ی ۷۵ درجه، برای طول‌های معادل ۱۰ و ۱۵٪ عرض کانال، به دلیل ذکر شده، چاله‌ی آب‌شستگی پایین دست تشکیل نمی‌شود.

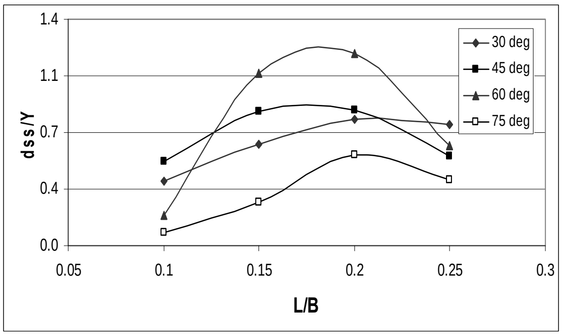


(الف)

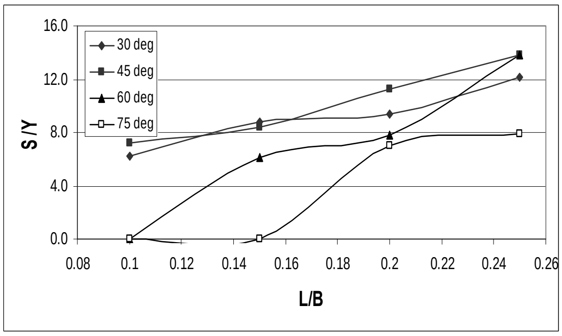


(ب)

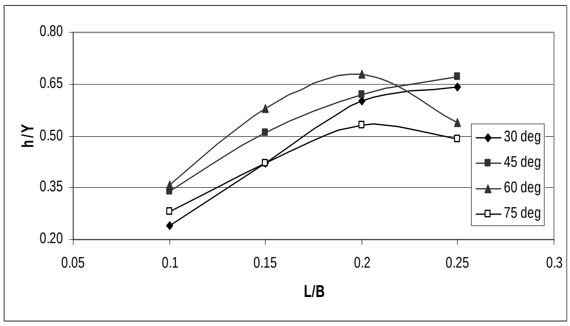
شکل۷ (الف) عمق آب‌شستگی بیشینه و (ب) حجم چاله‌ی آب‌شستگی در برابر طول آب‌شکن در موقعیت‌های مختلف استقرار آب‌شکن



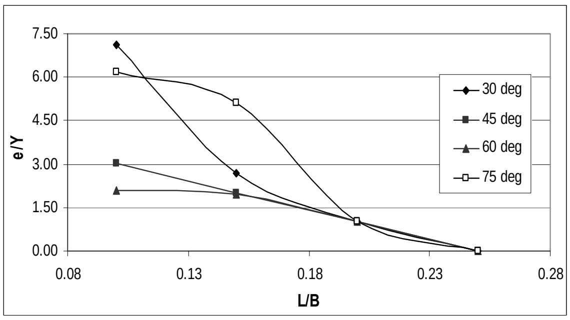
شکل ۸ تغییرات عمق چاله‌ی آب‌شستگی پایین دست در برابر طول آب‌شکن



شکل ۹ تغییرات فاصلهی چاله‌ی آب‌شستگی پایین دست در برابر طول آب‌شکن



شکل ۱۰ تغییرات ارتفاع رسوبات پایین دست در برابر طول آب‌شکن



شکل ۱۱ تغییرات آب‌شستگی در ساحل خارجی پایین دست در برابر طول آب‌شکن

همچنین محدوده‌ی تغییرات فاصله‌ی چاله‌ی آب‌شستگی دوم تا محل آب‌شکن بین ۰ تا ۱٤ برابر طول آب‌شکن می‌باشد. شکل (۱۰) بیانگر تغییرات ارتفاع نسبی رسوبات (بی بعد شده با عمق جریان) در پایین دست آب‌شکن، h/Y بر حسب L/B و برای عدد فرود ۰/۳٤ می‌باشد. روشن است که برای آب‌شکن در موقعیت ۳۰ و ٤۵ درجه ارتفاع بیشینه پشته‌ی رسوبی، روند صعودی از خود نشان می‌دهند. اما وقتی آب‌شکن در موقعیت استقرار ٦۰ و ۷۵ درجه قرار گیرد، تا طول معادل ۲۰٪ عرض کانال روند صعودی دارد و سپس نزولی می‌شود. علت آن این است که در موقعیت های استقرار آب‌شکن در انتهای قوس و برای طول بزرگتر از ۲۰٪ عرض کانال، رسوبات سریع‌تر به سمت مسیر مستقیم پایین دست قوس حرکت کرده وشکل گیری آن‌ها در عرض کانال از تقارن بیشتری برخوردار است؛ بنابراین، حرکت آن‌ها در این مسیراز انباشت و افزایش ارتفاع پشته‌ی رسوبی جلوگیری می‌کند. با توجه به نحوه‌ی حرکت رسوبات محدوده‌ی تغییرات، ارتفاع بیشینه‌ی رسوبات پایین دست، بین ۰/٤ تا ۰/۷ برابر طول آب‌شکن و محل پشته‌ی رسوبی بیشینه در پایین دست چاله‌ی آب‌شستگی دوم و در ساحل داخلی می‌باشد. شکل (۱۱) تغییرات نسبت بدون بعد طول آب‌شستگی (بی بعد شده با عمق جریان) در پایین دست آب‌شکن و در ساحل خارجی، e/Y برحسب L/B را در موقعیت‌های مختلف استقرار آب‌شکن و در عدد فرود ۰/۳٤را نشان می‌دهد.

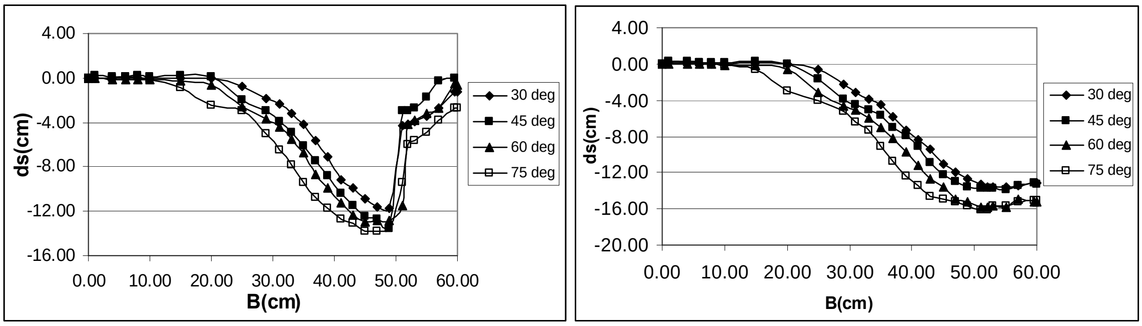
همانطور که مشخص است، در طول های بیشتر از ۲۰٪ عرض کانال، به علت حفاظت بال آب‌شکن از محدوده‌ی بیشتری بین بال پایین دست و ساحل خارجی، طول آب‌شستگی یکسان ودرطول معادل ۲۵٪ عرض کانال صفر است. البته برای طول معادل ۱۰ درصد عرض کانال و در موقعیت ۳۰ درجه، این طول به ۱٤ برابر طول آب‌شکن می‌رسد. نتایج نشان دهنده‌ی تأثیر طول آب‌شکن در کاهش آب‌شستگی پایین دست آب‌شکن می‌باشد. همچنین در موقعیت استقرار آب‌شکن در زاویه‌ی ٤۵ و ٦۰ درجه، به دلیل حرکت رسوبات به سمت ساحل خارجی و ناشی از برخورد مستقیم جریان از مسیر بالا دست به رسوبات خروجی از چاله، پارامتر e از مقادیر کمتری برخوردار است. با در نظر گرفتن مواردی نظیر کاهش میزان آب‌شستگی بیشینه و ابعاد چاله‌ی آب‌شستگی، توجه به رسوب‌گذاری در سواحل خارجی و همچنین ارتفاع رسوبات و عمق چاله‌ی آب‌شستگی پایین دست، آب‌شکن T شکل با طول معادل ۱۵٪ عرض کانال در بین طول‌های انتخابی به عنوان طول مناسب، در نظر گرفته شده است.

اثر موقعیت آب‌شکن بر توپوگرافی بستر

با تغییر موقعیت آب‌شکن در طول قوس (۳۰، ٤۵،٦۰ و ۷۵ درجه از قوس خارجی) و در جهت جریان میزان آب‌شستگی بیشینه و حجم چاله، آب‌شستگی افزایش می‌یابد. علت آن، افزایش تنش برشی و سرعت جریان با تغییر موقعیت آب‌شکن به سمت انتهای قوس می‌باشد.

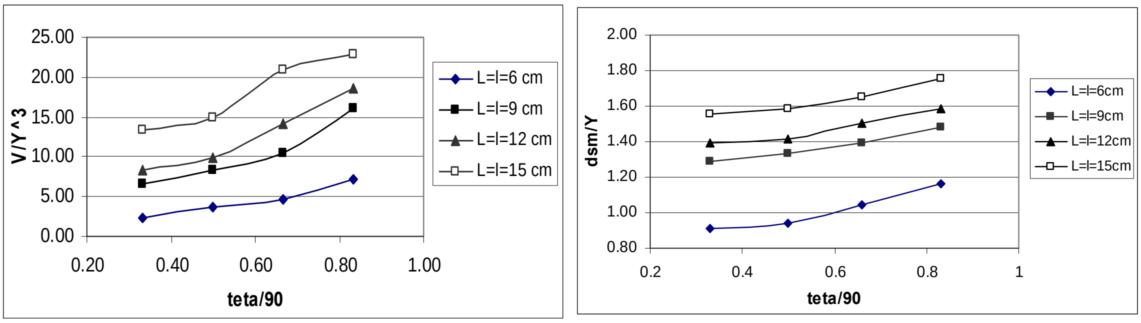
شکل (۱۲) نمونه‌ای ازمقاطع عرضی در بالادست و بلافاصله پایین دست آب‌شکن با طول آب‌شکن معادل ۱۵٪ عرض کانال و در موقعیت های استقرار مختلف و برای عدد فرود ۰/۳٤ را نشان می‌دهد. این شکل، نشان می‌دهد که در موقعیت استقرار آب‌شکن در زاویه‌ی ۳۰ و ٤۵ درجه، چاله‌ی آب‌شستگی کوچکتر است و همچنین در موقعیت ٤۵ درجه به دلیل ذکر شده، رسوبات به سمت ساحل خارجی حرکت کرده و آب‌شستگی در پایین دست آب‌شکن کمتر است. در موقعیت ۷۵ درجه نیز به دلیل افزایش سرعت جریان و در نتیجه تنش برشی، میزان آب‌شستگی افزایش می‌یابد.

درشکل (۱۳) نمودار بدون بعد dsm/Y و V/Y^3 در برابر افزایش زاویه‌ی استقرار آب‌شکن نشان داده شده است.



(ب) (الف)

شکل ۱۲ مقاطع عرضی (الف) بلافاصله در بالادست آب‌شکن و (ب) بلافاصله در پایین دست آب‌شکن در برابر موقعیت استقرار آب‌شکن در طول قوس برای طول جان آب‌شکن معادل ۱۵٪ عرض کانال



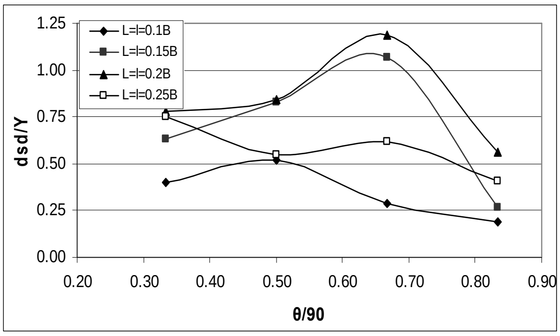
(ب) (الف)

شکل ۱۳ (الف) عمق آب‌شستگی بیشینه و (ب) حجم چاله‌ی آب‌شستگی در برابر موقعیت استقرار مختلف آب‌شکن در طول قوس

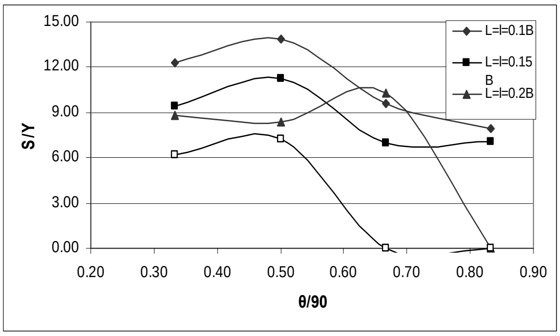
شکل (الف-۱۲) نشان می‌دهد که برای طول های معادل ۱۵، ۲۰ و ۲۵٪ عرض کانال و تا موقعیت ۶۰ درجه، روند تغییرات عمق بیشینه‌ی آب‌شستگی محسوس نیست؛ اما در موقعیت ۷۵ درجه به دلیل افزایش تنش برشی، روند صعودی دارد.

این روند صعودی، برای طول معادل ۱۰٪ عرض کانال از موقعیت استقرار آب‌شکن در زاویه‌ی ۶۰ درجه شروع می‌شود. نتایج آزمایشات، نشان می‌دهد که دامنه‌ی تغییرات عمق بیشینه‌ی چاله‌ی آب‌شستگی بین ۱/۲ تا ۲/۲ برابر طول آب‌شکن است. شکل (ب-۱۵) نیز بیانگر روند افزایشی حجم حفره‌ی آب‌شستگی با تغییر موقعیت آب‌شکن به سمت پایین دست قوس می‌باشد.

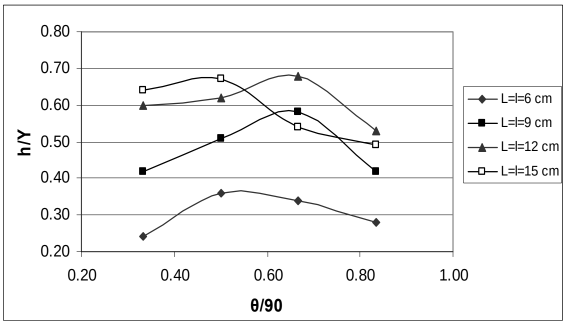
شکل (۱۴) تغییرات dsd/Y را بر حسب $\theta/90$ را برای طول های مختلف آب‌شکن نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، عمق چاله‌ی آب‌شستگی پایین دست تا زاویه‌ی استقرار، ۶۰ درجه‌ی صعودی، ولی در موقعیت ۷۵ درجه‌ی نزولی است که علت آن اتصال جریان به مسیر مستقیم و حرکت رسوبات به سمت مسیر مستقیم می‌باشد و باعث می‌شود که رسوبات به صورت متقارن در طول کانال حرکت نماید. البته در مورد آب‌شکن با طول معادل ۱۰٪ عرض کانال، روند صعودی عمق چاله‌ی آب‌شستگی پایین دست تا زاویه‌ی ۴۵ درجه می‌باشد و در نیمه‌ی دوم قوس نزولی است. دلیل آن، کاهش طول آب‌شکن و در نتیجه کاهش ناحیه‌ی جداشدگی جریان و توزیع یکنواخت رسوبات در عرض کانال می‌باشد.



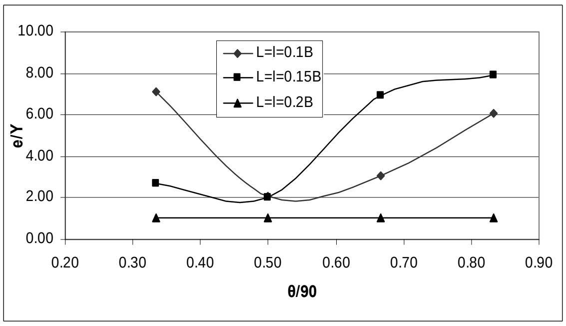
شکل ١٤ تغییرات عمق چاله‌ی آب‌شستگی پایین دست آب‌شکن در برابر موقعیت استقرار آب‌شکن در ساحل خارجی



شکل ١٥ تغییرات فاصله‌ی چاله‌ی آب‌شستگی پایین دست آب‌شکن در برابر موقعیت استقرار آب‌شکن در ساحل خارجی



شکل ١٦ تغییرات ارتفاع رسوبات پایین دست آب‌شکن در برابر موقعیت استقرار آب‌شکن در ساحل خارجی



شکل ١٧ تغییرات طول آب‌شستگی در ساحل خارجی پایین دست آب‌شکن در برابر موقعیت استقرار آب‌شکن در ساحل خارجی

شکل (١٥) تغییرات S/Y را در برابر $\theta/90$ نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، چاله‌ی آب‌شستگی پایین دست، برای طول معادل ۲۰٪ عرض کانال و در زاویه‌ی استقرار ٦۰ درجه دارای عمق ناچیز می‌باشد که این روند برای طول معادل ۲۵٪ عرض کانال در زاویه‌ی استقرار ٦۰ و۷۵ درجه محسوس می‌باشد.

شکل (١٦) تغییرات ارتفاع رسوبات پایین دست آب‌شکن در برابر موقعیت استقرار آب‌شکن در ساحل خارجی را نشان می‌دهد.

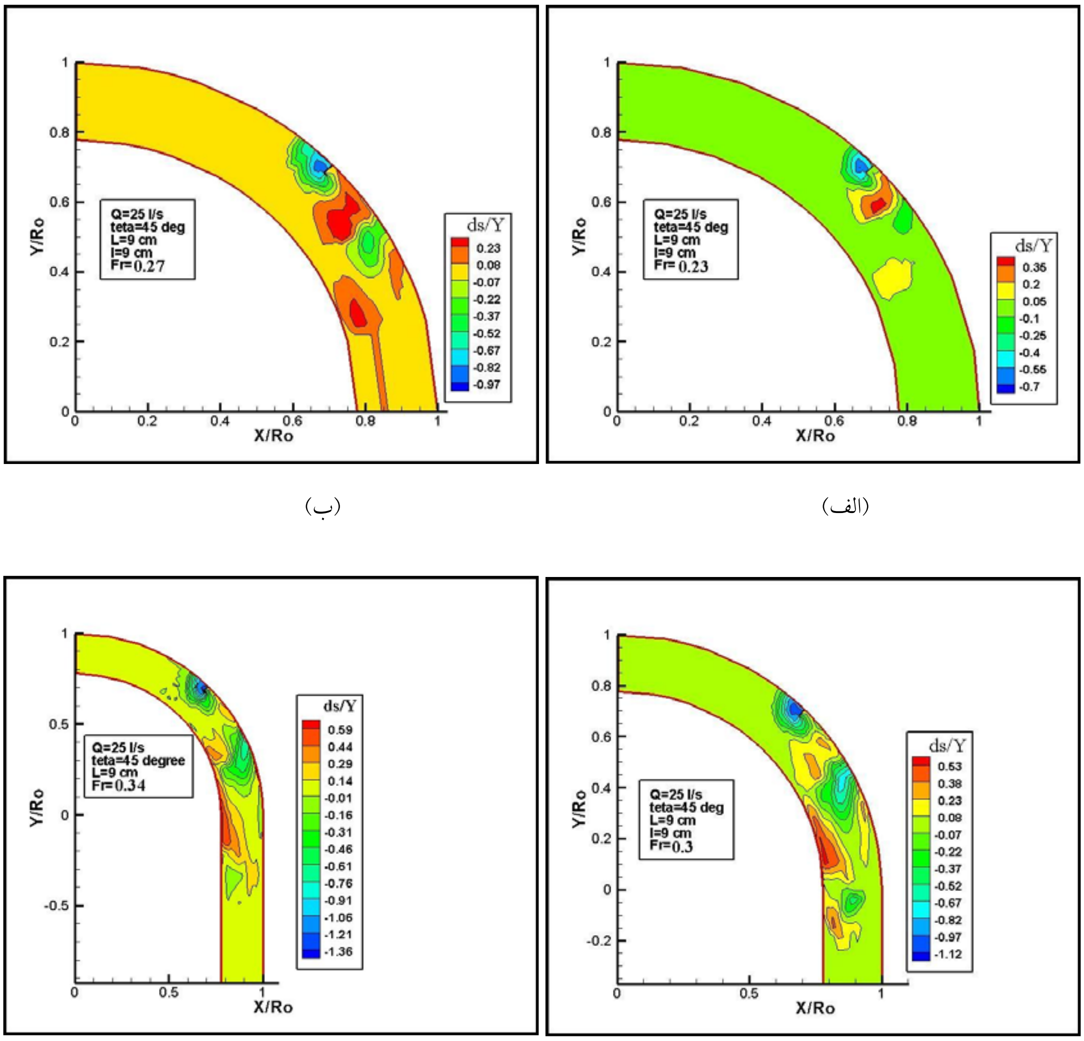
با تغییر موقعیت استقرار آب‌شکن به سمت پایین دست قوس و تا زاویه‌ی حدود ٦۰ درجه ارتفاع رسوبات در پایین دست آب‌شکن، روند صعودی دارد؛ ولی در زاویه‌ی حدود ۷۵ درجه به علت حرکت متقارن‌تر رسوبات در عرض کانال و در مسیر مستقیم، ارتفاع پشته‌ی رسوبی کاهش می‌یابد.

شکل (١٧) نیز تغییرات e/Y را بر حسب $\theta/90$ نشان می‌هد و بیانگر یکنواخت‌تر شدن توپوگرافی بستر در موقعیت‌های استقرار آب‌شکن در نیمه‌ی دوم قوس می‌باشد. طول آب‌شستگی در ساحل خارجی پایین دست آب‌شکن تا وسط قوس و برای طول های تا ۱۵٪ عرض کانال به علت برخورد جریان از مسیر مستقیم بالا دست قوس و جلوگیری از حرکت رسوبات به سمت پایین دست نزولی است؛ اما در نیمه‌ی دوم قوس، به دلیل تشدید آب‌شستگی در پایین دست آب‌شکن به دلیل تنش برشی، بیشترصعودی است. لازم به ذکر است که برای طول معادل ۲۰٪ عرض کانال، به دلیل ایجاد حفاظت بال

آب‌شکن، آب‌شستگی ثابت و در طول معادل ۲۵٪ عرض کانال طول آب‌شستگی پایین دست آب‌شکن ناچیز است و به همین دلیل در شکل (۱۷) رسم نشده است.

اثر عدد فرود جریان بر توپوگرافی بستر

با کاهش عدد فرود، عمق جریان افزایش و سرعت جریان کاهش می‌یابد. با کم شدن سرعت جریان، میزان تنش برشی کم‌تر می‌شود و از میزان آب‌شستگی در دماغه‌ی بالادست آب‌شکن کاسته می‌شود و باعث می‌گردد که حجم چاله‌ی ایجاد شده نیز کوچکتر شود. شکل (۱۸) برای نمونه‌ی توپوگرافی بدون بعد شده‌ی بستر با عمق جریان را برای آب‌شکن در موقعیت ٤٥ درجه و اعداد فرود ۲۳٪، ۲۷٪، ۳٪ و ۳٤٪ و آب‌شکن با طول ۱۵٪ عرض کانال نشان می‌دهد. در این شکل، R_o؛ شعاع خارجی قوس می‌باشد. با افزایش عدد فرود، پشته‌ی رسوبی به سمت ساحل داخلی قوس حرکت کرده و ارتفاع بیشینه‌ی رسوبات در ساحل داخلی قوس ایجاد می‌گردد.

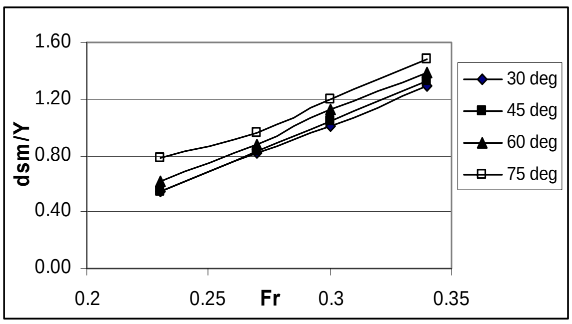


(الف) (ب) (ج) (د)

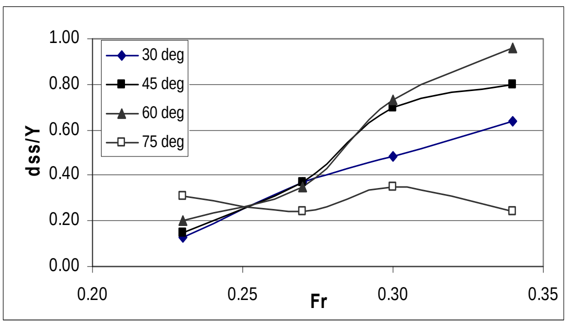
شکل ۱۸ توپوگرافی بدون بعد بستر (الف)Fr =0.23 (ب)Fr =0.27 (ج) Fr =0.3 (د) Fr =0.34 در موقعیت استقرار ٤٥ درجه

شکل (۱۹) تغییرات عمق نسبی آب‌شستگی بیشینه در برابر اعداد فرود مختلف را نشان می‌دهد و بیانگر افزایش عمق آب‌شستگی در اثر افزایش عدد فرود و در موقعیت‌های مختلف استقرار آب‌شکن می‌باشد. رسوبات خروجی از چاله‌ی آب‌شستگی تشکیل یک پشته‌ی رسوبی در پایین دست آب‌شکن را می‌دهد. حرکت این پشته‌ی رسوبی به مقدار عدد فرود بستگی دارد و در اعداد فرودکم‌تر، به علت این‌که قدرت حمل مصالح کاهش می‌یابد، حرکت این پشته‌ی رسوبی به سمت پایین دست کندتر می‌باشد. در پایین دست پشته‌ی رسوبی نیز به دلیل ایجاد جریان عبوری از روی رسوبات ته نشین شده و ایجاد گردابه‌های قائم در پایین دست پشته‌ی رسوبی، چاله‌ی آب‌شستگی دوم در پایین دست تشکیل می‌گردد. با افزایش عدد فرود و در موقعیت ۳۰ درجه، مقداری از رسوبات خروجی از چاله‌ی آب‌شستگی پیرامون آب‌شکن توسط جریان، وارد چاله‌ی پایین دست شده و به همین دلیل، عمق این چاله نسبت به موقعیت استقرار آب‌شکن در زوایای ٤٥ و ٦٠ درجه کم‌تراست. این امر در زاویه‌ی ۷۵ درجه به دلیل مسیر مستقیم بعد از قوس، محسوس‌تر می‌باشد. شکل (۲۰) تغییرات عمق چاله‌ی آب‌شستگی بی بعد شده‌ی پایین دست آب‌شکن در برابر عدد فرود جریان را نشان می‌دهد. این شکل، نشان می‌دهد که در اعداد فرود کم‌تر از حدود ۰/۲۷ موقعیت آب‌شکن اثر زیادی برروی عمق حفره‌ی آب‌شستگی پایین دست ندارد؛ در حالی که برای مقادیر بیشتر، عدد فرود اثر موقعیت آب‌شکن قابل توجه است. علاوه بر این، نتایج نشان داد که محدوده‌ی تغییرات عمق چاله‌ی آب‌شستگی پایین دست در اعداد فرود مختلف بین ۰/۲ تا ۱/۲ برابر طول آب‌شکن است.

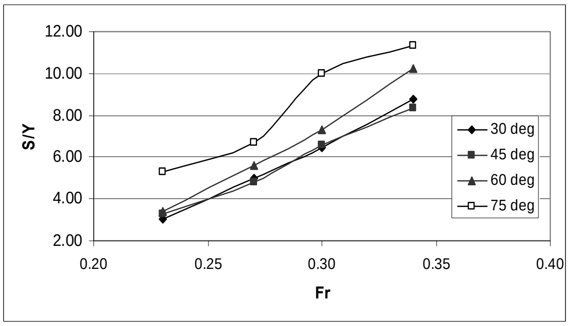
شکل (۲۱) نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود، جریان فاصله‌ی چاله‌ی آب‌شستگی پایین دست از محل استقرار آب‌شکن بیشتر می‌شود و برای موقعیت های ۳۰ و ٤٥ درجه، تغییر قابل ملاحظه‌ای در فاصله‌ی چاله‌ی آب‌شستگی پایین دست از آب‌شکن دیده نمی‌شود؛ در حالی که در نیمه‌ی دوم قوس و در زوایای ٦٠ و ۷۵ درجه، تغییرات مشهود است. همچنین محدوده‌ی تغییرات پارامتر S نیز بین ۲/۵ تا ١٤ برابر طول آب‌شکن در اعداد فرود مختلف، متغیر می‌باشد. شکل (۲۲) تغییرات عدد فرود جریان در برابر ارتفاع رسوبات بی بعد شده‌ی پایین دست را نشان می‌دهد. به علت برخورد جریان از مسیر مستقیم و تمایل حرکت رسوبات به سمت ساحل خارجی و سرعت کم‌تر حرکت رسوبات در زوایای ٤٥ و ٦٠ درجه، ارتفاع رسوبات کم‌تر می‌باشد. با توجه با حرکت سریع تر رسوبات در مسیر مستقیم بالا دست، ارتفاع پشته‌ی رسوبات در زاویه‌ی ۷۵ درجه، کم‌تر خواهد بود. در اعداد فرود کوچکتر ازحدود ۰/۲۵ تغییرات h کم‌تر است و با افزایش عدد فرود، اثر موقعیت آب‌شکن بر روی h بیشتر است. محدوده‌ی تغییرات پارامتر h نیز برای اعداد فرود مختلف، بین ۰/۵ تا ۰/۷ برابر طول آب‌شکن است.



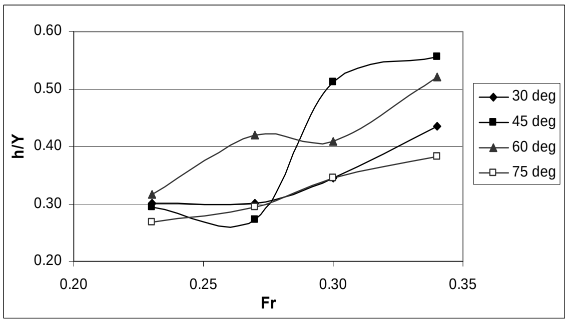
شکل ۱۹ تغییرات عمق آب‌شستگی بیشینه در برابر عدد فرود



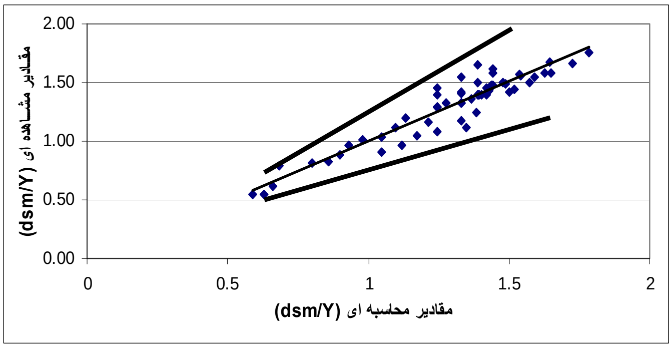
شکل ۲۰ تغییرات عمق چاله‌ی آب‌شستگی پایین دست آب‌شکن عددفرود



شکل ۲۱ تغییرات فاصله‌ی چاله‌ی آب‌شستگی پایین دست در برابر عددفرود



شکل ۲۲ تغییرات ارتفاع رسوبات پایین دست آب‌شکن در برابر عددفرود



شکل ۲۳ مقایسه‌ی بین مقادیر محاسبه‌ای و مشاهده‌ای عمق آب‌شستگی بیشینه نسبت به عمق جریان

روابط کلی در محاسبه‌ی ابعاد چاله‌ی آب‌شستگی

معادله‌ی کلی عمق آب‌شستگی بیشینه در زمان تعادل را با توجه به معادله‌ی (۳) در حالت کلی می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$\frac{dsm}{Y}=a(\frac{L}{B})^{b}(\frac{\theta}{90})^{c}(Fr)^{d} \qquad (٤)$$

حال با توجه به داده های آزمایشگاهی، مقادیر تجربی a، b، c و d بر اساس روش کم‌ترین مربعات محاسبه گردید و نهایتاً معادله‌ی (٤) پس از ساده سازی به صورت زیر تبدیل شد:

$$\frac{dsm}{Y}=25.7(L/B)^{0.42}(\theta/90)^{0.16}(Fr)^{1.9} \qquad (٥)$$

مقدار ضریب همبستگی(R^2) معادله‌ی بالا برابر ۰/۸۸ می‌باشد.

شکل (۲۳)، مقایسه‌ی بین مقادیر محاسبه شده با استفاده از معادله‌ی (۵) و مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی عمق بیشینه‌ی آب‌شستگی نسبی را نشان می‌دهد که بیانگر دقت قابل قبول معادله‌ی (۵) می‌باشد. به روش مشابه معادله‌ی زیر با ضریب همبستگی ۰/۸۵ جهت تعیین حجم چاله‌ی آب‌شستگی V به دست آمد. همچنین خطای بین مقادیر مشاهده‌ای و مقادیر محاسبه‌ای در مورد عمق آب‌شستگی و حجم چاله‌ی آب‌شستگی در پایان زمان تعادل به روش کم‌ترین مربعات، به ترتیب ۸/۵ و ۲٤٪ شد:

$$\frac{V}{Y^{3}}=25.7(\frac{L}{B})(\frac{\theta}{90})^{.91}(3.75Fr)^{6.44} \qquad (٦)$$

نتیجه گیری

در این تحقیق، آزمایشات برای تعیین تغییرات توپوگرافی بستر درپایین دست و اطراف آب‌شکن T شکل مستقر در قوس ۹۰ درجه با رویکرد به مطالعه‌ی کیفی الگوی جریان، انجام گرفته است. پارامترهای مؤثر در این تحقیق، تغییرات طول آب‌شکن، موقعیت استقرار آب‌شکن در قوس و عدد فرود جریان بوده است. نتایج این تحقیق، نشان می‌دهد که:

- رسوب‌گذاری در ساحل خارجی پایین دست آب‌شکن برای آب‌شکن های با طول بزرگتر مشهود می‌باشد.
- با افزایش طول آب‌شکن، آب‌شستگی موضعی بیشتر و افزایش قدرت حمل رسوبات، عمق بیشینه آب‌شستگی و حجم چاله‌ی آب‌شستگی بیشتر می‌شود و محدوده تغییرات عمق آب‌شستگی بیشینه بین ۱/۲ تا ۲/۲ برابر طول آب‌شکن است.
- چاله‌ی آب‌شستگی ایجاد شده در پایین دست آب‌شکن در موقعیت استقرار، ۷۵ درجه از عمق، کم‌تر و فاصله‌ی بیشتری نسبت به محل آب‌شکن برخوردار است.
- با افزایش طول آب‌شکن، فاصله‌ی چاله‌ی آب‌شستگی پایین دست از محل استقرار آب‌شکن بیشتر می‌شود و محدوده‌ی تغییرات آن بین ۰ تا ۱٤برابر طول آب‌شکن است.
- در موقعیت استقرار آب‌شکن در ۳۰ و ٤٥ درجه، ارتفاع بیشینه‌ی پشته‌ی رسوبی، روند صعودی از خود نشان می‌دهند؛ اما وقتی آب‌شکن در موقعیت استقرار ٦۰ و ۷۵ درجه قرار می‌گیرد، تا طول معادل ۲۰٪ عرض کانال روند صعودی و سپس نزولی دارد و محدوده‌ی تغییرات آن بین ۰/٤ تا ۰/۷ برابر طول آب‌شکن است.
- برای آب‌شکن با طول های ۲۰ و ۲۵٪ عرض کانال، طول آب‌شستگی در پایین دست آب‌شکن و در ساحل خارجی آب‌شکن صفر است، ولی دامنه‌ی تغییرات طول آب‌شستگی پایین دست، بین۰ تا ۱٤ برابر طول آب‌شکن است.
- چاله‌ی آب‌شستگی پایین دست برای آب‌شکن های با ابعاد بزرگتر از ۲۰٪ عرض کانال و مستقر در زاویه‌ی ٦۰ درجه به بعد تشکیل نمی‌گردد.
- با تغییر موقعیت استقرار آب‌شکن به سمت پایین دست قوس و تا زاویه‌ی ٦۰ درجه ارتفاع رسوبات در پایین دست آب‌شکن، روند صعودی دارد؛ ولی در زاویه‌ی ۷۵ درجه کاهش می‌یابد.
- طول آب‌شستگی در ساحل خارجی پایین دست آب‌شکن تا وسط قوس و برای طول های تا ۱۵٪ عرض کانال، نزولی است؛ اما در نیمه‌ی دوم قوس، صعودی است. لازم به ذکر است که برای طول معادل ۲۰٪ عرض کانال آب‌شستگی ثابت و در طول معادل ۲۵٪ عرض کانال، طول آب‌شستگی پایین دست آب‌شکن ناچیز است.
- با افزایش عدد فرود، جریان ارتفاع رسوبات پایین دست آب‌شکن افزایش می‌یابد و برای اعداد فرود مختلف، تغییرات آن بین ۰/٥ تا ۰/۷ برابر طول آب‌شکن می‌باشد.
- در اعداد فرود مختلف، عمق چاله‌ی آب‌شستگی پایین دست در موقعیت های استقرار آب‌شکن در زوایای ۳۰ و ٤٥ درجه بیشتر و در زاویه‌ی ۷۵ درجه کمترین مقدار را داراست و دامنه تغییرات آن بین ۰/۲ تا ۱/۲ برابر طول آب‌شکن است.
- با افزایش عدد فرود، جریان فاصله‌ی چاله‌ی آب‌شستگی پایین دست از محل استقرار آب‌شکن بیشتر می‌شود که این مسأله در موقعیت ۷۵ درجه مشهودتر است. دامنه‌ی تغییرات این پارامتر بین۲/٥ تا ۱٤ برابر طول آب‌شکن است.
- با تغییر موقعیت استقرار آب‌شکن به سمت پایین دست قوس، آب‌شستگی بیشینه و ابعاد چاله‌ی آب‌شستگی بیشتر می‌شود. همچنین طول آب‌شستگی پایین دست آب‌شکن، گسترش پیدا می‌کند.
- معادلاتی مناسب، جهت تعیین عمق آب‌شستگی بیشینه و حجم چاله‌ی آب‌شستگی، حول آب‌شکن T شکل با توجه به پارامترهای ذکر شده ارائه گردیده است.

مراجع

1. Berge, M. A. "Flow Processes in a Curved Alluvial Channel" phd. Thesis in Iowa University, USA, 365p. (1990).

2. Blanckaert K. and Graf, W.H. "Mean Flow and Turbulence in Open-Channel Bend" *Journal of Hydraulic Engineering,* Vol. 127, No. 10. PP, 126-138. (2001).
3. Barbhuiya, A.K. and Dey, S. "Turbulent Flow Measurement by the ADV in the Vicinity of a Rectangular Cross-Section Cylinder Placed at a Channel Side Wall" Flow Measurement and Instrumentation. Vol. 15, No.4, PP. 221–237. (2004).
4. Dey, S. and Barbhuiya, A.K. "Turbulent Flow Field in a Scour Hole at a Semi Circular Abutment" *Canadian Journal of Civil Engineering.* Vol. 32, No.1, P. 213–232. (2005).
5. Dey, .S an" Flow Measurement and Instrumentation. Vol.17, PP. 13-21. (2006).
6. Lian H. C. and Hsied T.Y and Yang J. C. "Bend-Flow Simulation Using 2d Depth – Averaged Mode" *Journal of Hydraulic Engineering,* Vol. 125, No. 10. (1999).
7. Marion, A. and Zaramella, M. "Effects of Velocity Gradients and Secondary Flow on the Dispersion of Solutes in a Meandering Channel" *Journal of Hydraulic Engineering.* Vol, 132. PP, 1295-1302. (2006).
8. Nouh, M. A. and Townsend, R. D. "Shear-Stress Distribution in Stable Channel Bends" *Journal of Hydraulic Division,* Vol. 105, No. HY.10. (1979).
9. Rodi, W. and Michael, A.Leschziner. "Calculation of Strongly Curved Open Channel Flow" *Journal of the Hydraulic Division,* Vol. 105, No. HY10. (1978).
10. Shukry, A. "Flow around Bends in an open flume" Transactions, ASCE, Vol. 115. (1950).
11. Tang, XL., Chen, ZC., and Yang, F. "Dynamic Large Eddy Simulation of Secondary Flow Near a Groyne" *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical simulation,* Vol.7, No.3, 257-262.(2006).
12. Yang, S. Q. "Interactions of Boundary Shear Stress, Secondary Currents and Velocity" Fluid Dynamics Research, Vol.36, PP, 121-136. (2005).
13. Ghodsian, M. and Vaghefi, M. "Experimental Study on Scour and Flow Field in a Scour Hole Aaround a T Shaped Spur Dike in a 90° Bend" *International Journal of Sediment Research,* Vol. 24, No. 2, PP. 145-158.(2009).
14. Vaghefi M. and Ghodsian M., Salehi Neyshaboori S. A. A. "Experimental Study on the Effect of a T-Shaped Spur Dike Length on Scour in a 90° Cannel Bend" *Arabian Journal Of Science and Technology,* Vol. 34, No. 2B, PP. 337-348.(2009).

۱۵. محمد واقفی، مسعود قدسیان، سیدعلی اکبر صالحی نیشابوری " مطالعه‌ی آزمایشگاهی الگوی آب‌شستگی پیرامون آب‌شکن T شکل منفرد مستقر در قوس ۹۰ درجه" مجله‌ی علمی‌و پژوهشی منابع آب ایران، سال چهارم، شماره ۳، ۴۱–۵۷. (۱۳۸۷).

۱۶. محمد واقفی، مسعود قدسیان، سیدعلی اکبر صالحی نیشابوری. "بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان کمی‌اطراف آب‌شکن T شکل در قوس ۹۰ درجه با بستر صلب" مجله علمی‌و پژوهشی دانشگاه تبریز، جلد ۳۷، شماره ۳، ۷۵–۸۱. (۱۳۸۷).

۱۷. محمد واقفی، مسعود قدسیان ، سیدعلی اکبر صالحی نیشابوری. "بررسی آزمایشگاهی اثر شعاع انحنا و موقعیت استقرار آب‌شکن T شکل منفرد در قوس ۹۰ درجه بر میزان آب‌شستگی اطراف آنها" مجله علمی‌و پژوهشی هیدرولیک ایران، دوره چهارم، شماره ۱، ۹۱–۱۰۷. (۱۳۸۸).

۱۸. محمد واقفی، مسعود قدسیان ، سیدعلی اکبر صالحی نیشابوری. "مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان سه بعدی و آب‌شستگی درقوس ۹۰ درجه" مجله علمی‌و پژوهشی هیدرولیک ایران، دوره سوم، شماره ۳، ۴۱–۵۷. (۱۳۸۷).